

光産業の共通ツールとしてのフォトニック結晶

(株)フォトニックラティス 川上彰二郎, 佐藤尚, 川嶋貴之, 井上喜彦

[要旨]

フォトニック結晶の再現性, 生産性に優れた作製法である自己クローニング法について, プロセスの概要・特徴, 多方面の産業応用について見取り図を提供する。基板の上に凹凸パターンを作り, その上にA, B二種類の材料をスパッタデポジション・バイアスエッチングを組み合わせるというシンプルなプロセスによって, 希望する種類の人工誘電体を設計通りの位置に作製・異種集積することが可能であることを例証する。そのような部品の産業展開の動向を, ノンテレコム, テレコム両方にわたってレビューする。

1. はじめに

フォトニック結晶が学会の話題になり出してからかなりの年数が経つ。例えば自己クローニング試料の写真を本誌の表紙に使って頂いたのは5年前のことである。フォトニック結晶についての周囲からの視線は, 時間と共に,

「新しい, 面白いものが出てきた」「研究がずいぶん盛り上がっている」「現実のぐりやくは出てきたか?」

と移り変わっている。また, フォトニック結晶技術のメインの方向の考え方にはつぎの二つがある。

(A) 複雑な構造を巧妙なプロセスで実現し, 学術的に最先端の実験に成功する。

(B) 複雑な構造をシンプルに作製し, 新しい「日用品」, 光産業の新しいツールとする。

私たちのスタンスは(B)であって, 「3次元フォトニック結晶は人工誘電体で, 光通信にもノンテレコム応用にも使える材料である。新しいパッシブ部品を開発し, 現実の利点を早期に立証しよう」と考えている。私たちは自己クローニングというプロセス技術

を基本にしているので, プロセスの特徴と現在までの到達点, ノンテレコム応用, テレコム応用という順序で解説する。

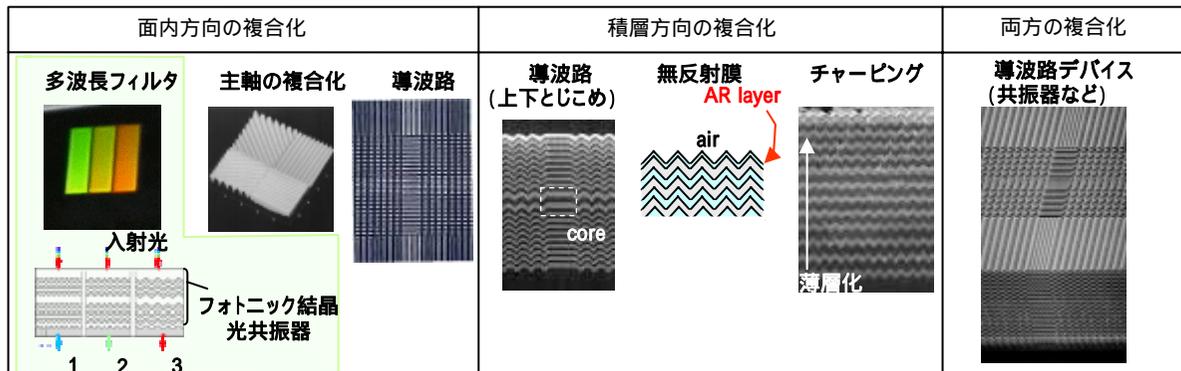
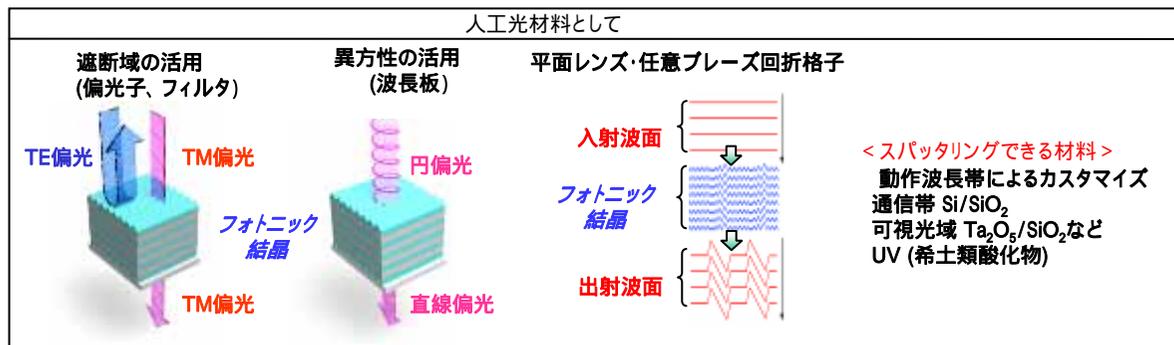
表1 自己クローニング法によるフォトニック結晶の特質

実現できる 周期性構造	「膜厚方向に三角波形の凹凸を持つ 誘電体多層膜」が基本
面内方向 周期性	三角格子, 正方格子, 溝列など, 基板パターンにて制御
膜厚方向 周期性	1周期あたりの厚さ, 最大周期数などで制御
実証済みの 製膜材料	Si, SiO ₂ , TiO ₂ , Ta ₂ O ₅ , Nb ₂ O ₅
光学特性	偏波ごとの透過/遮断波長域, 複屈折性など

2. 自己クローニングの特徴

自己クローニング法は, パターン化された凹凸基板の上にスパッタ積層とバイアスエッチングを組み合わせることで定常的な3次元凹凸パターンを形成する方法である^[1,2]。作製プロセスとしての特徴を表1に要約する。また, その光学的な特徴を表2に示す。

表2 自己クローニングフォトニック結晶の様々な応用例



自己クローニングとは何か。凹凸のある基板の上にバイアスパタリングで製膜を行うとき、表面の形が、堆積とエッチングの影響を受けて変化していく。適当な条件のもとでは、ある定常的な凹凸形状があって製膜を重ねて行くとその形に漸近し、複製していく。基板の凹凸を2次元周期的にし、屈折率の高い・低い2種類の材料でこのプロセスを繰り返すと、屈折率の高い部分、低い部分が3次元的に入り組んだ周期構造ができる。このプロセスを私たちは自己クローニングと呼んでいる。

今まで最も多く経験を積んだ周期溝上の自己クローニングについて特徴的な点を要約する。

自己整形： 方形断面をもつ溝の列を石英基板上に作製し、その上に同じSiO₂を積層して三角波状に整形する例(図1)。また、表2の は、積層を重ねるに従って三角形状がより完全なものに近づくと、いう本プロセスの特徴を表している。

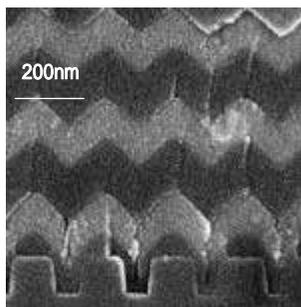


図1 矩形パターン基板からの形状成長

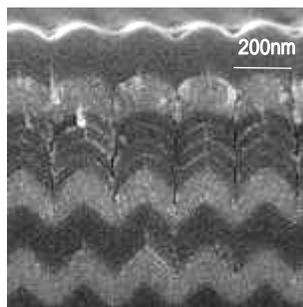


図2 無バイアス層の成長

無バイアス層

複合構造(エピタキシャル結晶, ポリ結晶, チャーピング): 表2のには基板の形状, 積層時の厚さ制御によって、面内方向, 厚さ方向に格子定数を制御していわばヘテロエビ構造を作製した例を示す。また同じく, にはいわばポリ結晶状の積層例を示す。

積層周期数(どのくらいの層数まで可能か): 限界は不明であるが、いままで100層内外の積層は日常的に行っている。

整形のメカニズム: 図2は自己クローニング法において一部分でバイアス印加を意図的に止めて形状が崩れて行く様子を観察した結果である(マーカーを用いている)。積層とバイアスエッチングのバランスが必要なことが明らかである。

プロセス安定性, 生産性: ときどき誤解されるが、自己クローニングが実現される条件の範囲は狭いものでも不安定なものでもない。バイアスパッタ製膜では「ノジュール」と通称される、層から層への欠陥伝搬現象が知られていて、その条件の範囲は(幸か不幸か)広い。簡単に言えば、パタン化された基板の上にノジュールが生ずる条件で製膜すれば自己クローニングが実現される。

スループットはスパッタ装置の構成で決まる点において、既存の成膜プロセスと同様である。

3. 産業応用(ノンテレコム)

3.1 液晶プロジェクト用偏光子

一般の光学多層膜に垂直に光を入射した場合、遮断域は現れるが偏波依存性は見られない。一方で、表2に示す自己クローニング型2次元フォトリソニック結晶では、その構造異方性から垂直入射光に対して偏光子として機能させることができる。

例として図3に透過率の計算結果を示す。矢印で示した帯域ではTE偏光(電界が溝に平行に振動)はストップバンドとなっており、多層膜で反射されるが、TM偏光(溝に垂直に振動)ではその帯域がパスバンドにあたるため、そのまま多層膜を透過する。

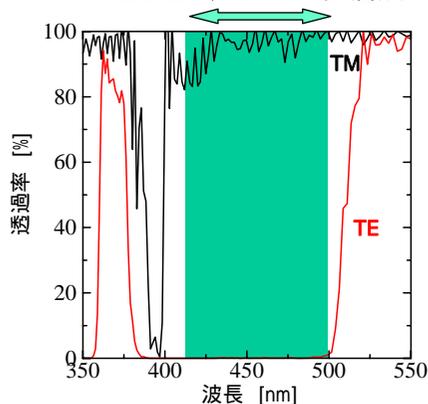


図3 Finite Difference Time Domainシミュレーターを用いた青色用フォトリソニック結晶偏光子の設計例

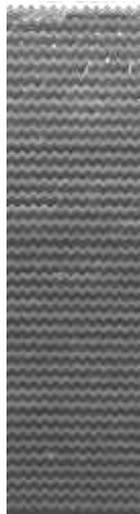
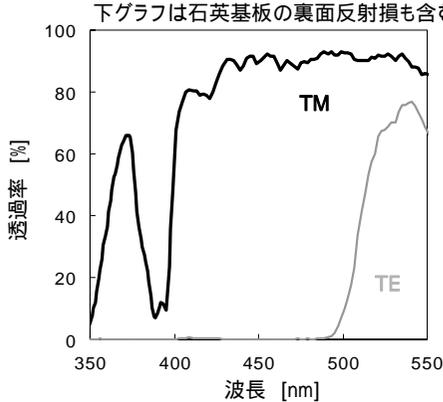
この反射型の偏光子の特長を以下にまとめる。

1. 大面積化が容易であること
2. 材料と構造の周期により動作帯域を選択できること
3. 無機材料で構成されること
4. 基板パターンにより光軸方位を面内で任意に制御できること
5. 基板の材料を自由に選択できること

これまで光通信用偏光子はa-Si/SiO₂の組み合わせですでに実用レベルを実証している^[3]。一方で可視光用の偏光子の開発も進めている。具体的には液晶プロジェクタでの応用を想定している。液晶プロジェクタは通常、光源からの光をRGBに分けた後にそれぞれの光に対して、液晶ライトバルブを用いて画素ごとに輝度制御を行い、最後にそれらを合成して画像を得ている。その液晶ライトバルブの前後には偏光子が配置されるが、その入射側に設置される偏光子を想定している。従来は有機膜を用いた偏光子が多く用いられてきたが、近年のプロジェクタの高輝度化、小型化に伴い光のパワー密度が増加し、偏光子にも耐熱性が強く求められてきている⁽⁴⁾。そうした状況で無機材料のみで構成され、200 °Cの環境下でも問題ないフォトニック結晶偏光子が注目されている。材料にはNb₂O₅/SiO₂を用いており、帯域拡大のために積層周期のチャージングを行なっている。図4aに青の帯域で動作する偏光子を試作した結果と図4bにはその断面SEM像を示す。

現在、量産化にむけた開発を開始している。フォトニック結晶初の民生部品となり、その与えるインパクトはフォトニック結晶の分野に留まらず大きい。

- ・測定器：日立製分光光度計U4100
- ・材料：SiO₂/Nb₂O₅
- ・基板：石英



a. 透過特性の測定結果 b. 断面SEM像
図4 青色用フォトニック結晶偏光子の試作結果

3.2 エリプソメータ

エリプソメータは試料(薄膜)からの反射光の偏光解析を行うことで膜の光学定数や厚さを求める計測器である。従来は偏光子あるいは波長板の精密駆動機構あるいは位相変調機構が必須であり、小型化、高速化には限界があった。自己クロージング型

フォトニック結晶では、光軸方位の異なる偏光子や波長板をモリシック集積することが容易であるから、可動部なしの並列処理型エリプソメータが可能になる⁽⁵⁾。本構成では小型、高速、安価、ロバスト性を実現し、従来のエリプソメータのイメージを一新することができたため、in situ測定あるいはインライン計測など新しい利用分野を開拓することができる。並列処理型エリプソメータの概念図を図5に示す。

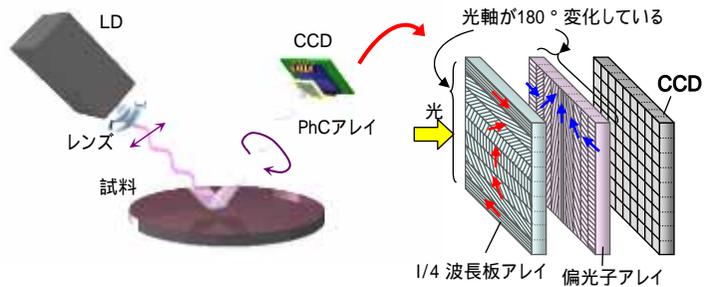


図5 フォトニック結晶アレイを用いたスタティック・エリプソメータの概念図

LDから出射された光は試料表面で反射され、2枚のフォトニック結晶チップを通りCCDで受光される。フォトニック結晶チップは、それぞれストライプ状の領域ごとに結晶軸が0度から180度まで変化している1/4波長板(QWP:Quater Wave Plate)アレイと偏光子アレイで構成されている。各素子のストライプが直交するように重ね合わせ、その後方にCCDを配置することで、様々な結晶軸の波長板と偏光子の組み合わせを透過した光の強度を明暗パターンとして瞬時に読み取ることができる^[6]。

図6(a),(b)は水平方向の直線偏波($\theta = 0$, $\phi = 0$)と右回り円偏波($\theta = 1$)を検出したときの透過光強度パターンの計算値である。図より入射偏波に応じた特徴的な明暗パターンが得られることがわかる。偏波方位が変わるとパターンは並行移動し、垂直方向の直線偏波および左回りの円偏波ではそれぞれ(a),(b)の明暗が逆転したパターンとなる。

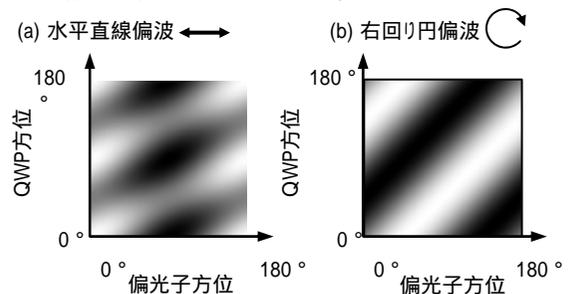


図6 明暗パターンの偏光依存性。

現在行っている実験では5.625°ずつ方位が変わる32列のフォトニック結晶アレイを作製した。アレイの幅は約50 μmである。2004年秋現在、小型モジュール化および精度向上に向けて第2次の開発を進めている。図7はCCDチップの表面に直接、フォトニック結晶チップを貼り合せたものである。

3.3 その他のノンテレコム応用

他にも光一般の共通ソールの部品は多いが、原稿の長さの制約から名前を挙げるにとどめる。

- (1) 任意ブレイズの回折格子[表2]
- (2) 波長板[表2]
- (3) 紫外・赤外域、ハイパワー用の板状偏光子など、多様な開発を実行中である。

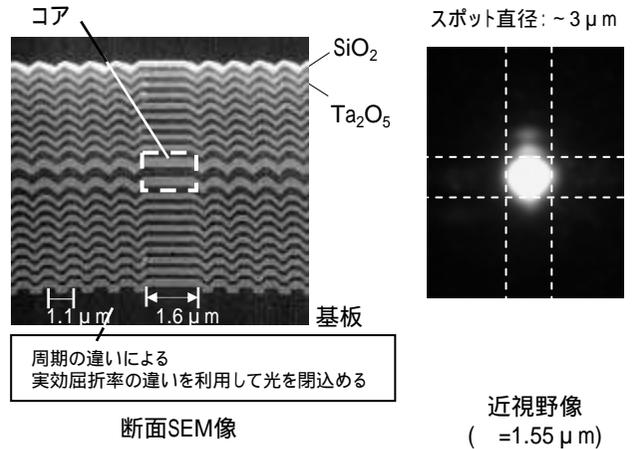


図8 格子変調型フォトニック結晶導波路の概略図

フォトニック結晶アレイ

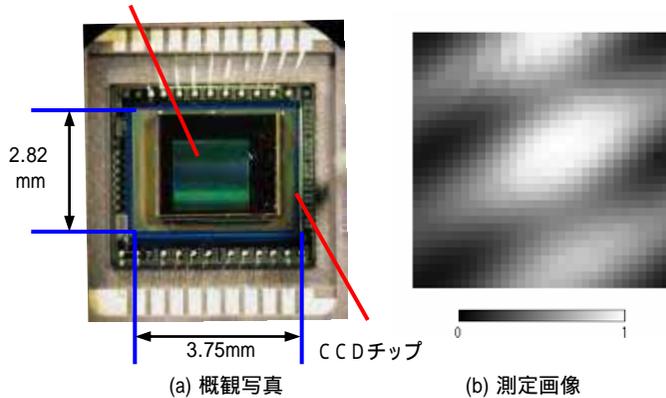


図7 フォトニック結晶とCCDの一体化

4. 通信応用

4.1 WDM用光回路

自己クローニング法を用いることで光導波路が実現できる[7]。パターンの周期、積層の周期の違いから実効屈折率の違いを発現させ、格子変調型チャンネル導波路として機能させることができる(図8)。この方式の特長は始めに用意する基板のパターンをデザインすることで、面内に異なる屈折率を持つ領域や、ブラッグミラー、共振器などの機能性部品を光導波路と併せて一度の積層で実現できることにある。また一般の石英系光回路とは異なり、コア部形成のためのエッチング、埋め込みといった工程がないため、コア部が近接した方向性結合器も容易に実現できる。

これまでの検討の結果、伝搬損失は導波路部分で0.1dB/mmを達成し、光ファイバとの結合損失も0.43dB/pointと実用的なレベルがねらえることを確認している。また光共振器、ブラッグミラーといった機能部分の動作実証も行なっている[8]。その一例として図9に日本電気(株)との共同研究の結果である波長選択方向性結合器を示す。これまで伝送実験を行ない良好な結果を得ている[9]。

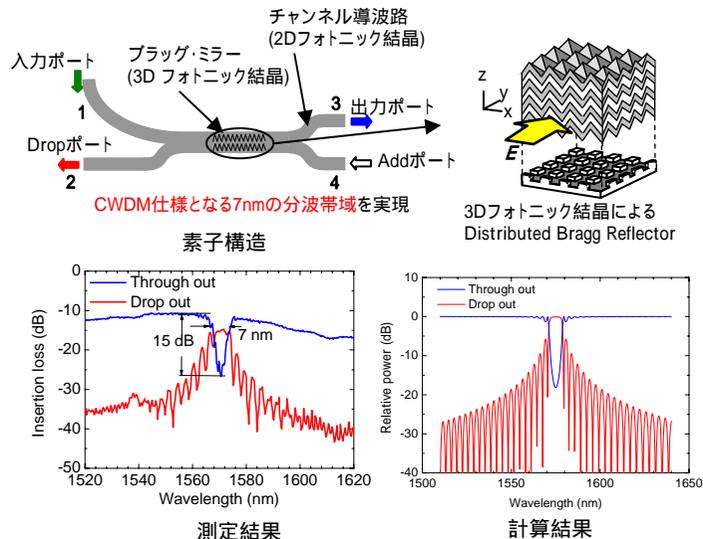


図9 格子変調型フォトニック結晶導波路の概略図

4.2 偏波モニタ

自己クローニング型複合結晶の光通信応用のもう一つの例として、小型かつ高精度な偏波モニタが挙げられる。偏波モニタとは偏光子や波長板を用いて光ファイバ中を伝搬する光の偏光状態を計測するデバイスであり、次世代の高速光通信において必須となる偏波モード分散補償器(PMDC)を実現する上でのキーデバイスとなっている^[10]。

図10に我々の開発したフォトニック結晶型偏波モニタの構成を示す。方位角の異なる4つの偏光子からなるフォトニック結晶偏光子アレイと1/4波長板とを重ねて配置し、各領域を透過する光の強度を個別に測定することによって入射光のストークスパラメータを算出する。図中に示したAFM像は作製した偏光子アレイであり、方位が45°づつ異なる。このように自己クローニング技術により小型で高精度な偏光子アレイを製作ができることから、従来型の製品と比較して、部品点数が大幅に削減できるだけでなく、各部品の実装も容易となるため、測定精度の高い偏波モニタを安価に実現できる。

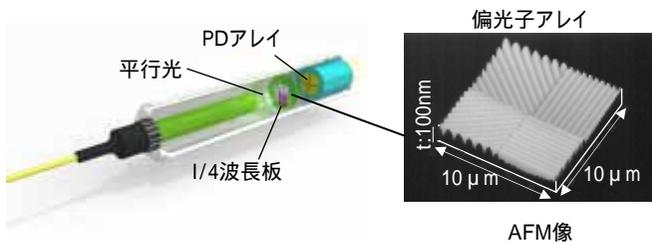


図10 SOPモニターの構成図

これまでに図11に示すような小型の試作モジュール(15×40mm)を完成させた。既にDOP(偏光度: Degree of Polarization)精度で2.5%程度を達成しており、従来の製品と比べても良好な性能を実現している。さらに光学設計の見直しにより精度1%が達成可能との見積もりを得ている^[11]。



(a) 光ヘッド (b) 制御回路 (c) ソフトウェア画面

図11 開発したSOPモニターの概観

4.3 光アイソレータ

前述の光通信常用偏光子をもちいて図12に示す構成の光アイソレータの開発を行なっている^[12]。光ファイバフェルル内に挿入して使用することを想定している。特長としてはフォトニック結晶偏光子をファラデー回転子上に直接形成していること、ファラデー回転子に自己保磁型の結晶を用いていることである。特にファラデー回転子への直接形成はフォトニック結晶偏光子の持つ特長を活かしており、その結果、部品点数の削減、高集積化、接着剤を使用しないことによる高信頼性化を実現した。コンパクトで実用レベルの光アイソレータが実現できており、市場参入への準備は整っている。

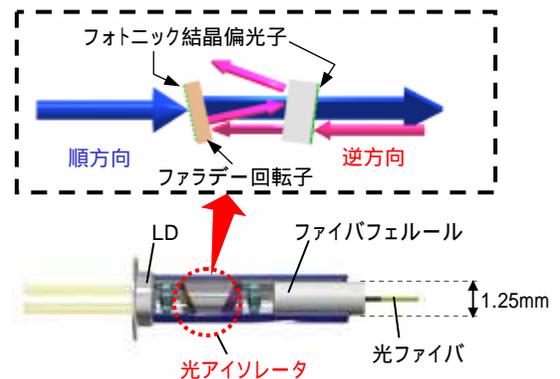


図12 フォトニック結晶偏光子を用いた光アイソレータの概略図

5. 結び

本稿では、複数種類の誘電体を3次元的な周期構造に組み上げるのに適した製膜プロセスである自己クローニング法について、製膜技術自体・デバイス応用の両面から解説した。積層の出発点となる基板上的(複数種類の)2次元周期構造、積層途中の(複数種類の)厚さ方向の周期構造の組み合わせ自由度が高いので、種々の光応用の要求に応えることができる。

バンドギャップ、異方性、複屈折性が利用できるバルクの人工誘電材料としては赤外・可視・紫外用偏光子あるいは波長板など、複合構造の応用としては空間並列による計測や映像処理などを例にとって有用性を説明した。ここで述べた以外にも新しい応用面は沢山潜んでいることは明らかなので、私たちはすでに発見された鉱脈から掘り出し精錬すること、未知の鉱脈を探索することを平行して行っている。

[参考文献]

1. S. Kawakami, T. Kawashima, and T. Sato, "Mechanism of shape formation of three-dimensional nanostructures by bias sputtering", *Appl. Phys. Lett.*, vol.74, no.3, pp.463-465, January 1999.
2. 川嶋貴之、大寺康夫、川上彰二郎 “自己クローニング法によるフォトニック結晶の作製と光学デバイスへの応用”, 日本表面科学会学会誌, Vol.22, pp.723-728, 2001年11月
3. 川嶋貴之、大寺康夫、佐藤尚、川上彰二郎, “2次元フォトニック結晶偏光分離素子の作製とその高性能化”, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, OPE99-109, 1999年12月
4. Michel F. Weber, Carl A. Stover, Larry R. Gilbert, Timothy J. Nevitt, Andrew J. Ouderkirk, "Giant Birefringent Optics in Multilayer Polymer Mirrors", *SCIENCE* vol.287, 31 March 2000.
5. 菊田久雄、岩田耕一, “偏光画像計測システム”, *O plus E*, vol.25, No.11, pp.1241-1247
6. T. Sato et al., *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, Elsevier Vol. 2, Issue 2, pp. 149-154, (October 2004).
7. Y. Ohtera, T. Kawashima, Y. Sakai, T. Sato, I. Yokohama, A. Ozawa, and S. Kawakami, "Photonic crystal waveguides utilizing modulated lattice structure", *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 24, pp. 2158-2160, 2002.
8. 三浦健太 他, “自己クローニング型フォトニック結晶導波路の低損失化”, 電子情報通信学会論文誌 C(accepted)
9. M. Shirane, A. Gomyo, K. Miura, Y. Ohtera, and S. Kawakami, "Coupled waveguide devices based on autocloned photonic crystals", *Jpn. J. App. Phys.*, vol.43, no.4B, pp.1986-1989, April 2004.
10. 久保輝洋、磯村章彦、イェンス・ラスムッセン、土居正治、石川丈二, “超小型ストークス・ポラリメータの高精度・高速応答性”, 2004年 電子情報通信学会ソサイエティ大会 B-10-37
11. 青山勉、橋本直樹、佐藤尚、千葉貴史、上塚尚登、川上彰二郎, “フォトニック結晶偏波モニタ”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-96, 2004年9月.
12. 石川理、佐藤尚、川嶋貴之、青山勉、川上彰二郎, “フォトニック結晶偏光子を用いた小型アイソレータの諸特性”, 電子情報通信学会サイエティ大会, C-3-41, 2003年9月.